

Mikko Muuronen

Hiilidioksidin (CO₂) käyttö kylmäaineena, kylmälaitostyypit ja kylmälaitoksen mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

24.05.2016

<p>Tekijä Otsikko</p> <p>Sivumäärä Aika</p>	<p>Mikko Muuronen Hiilidioksidin (CO₂) käyttö kylmäaineena ja kylmälaitoksen mitoitus</p> <p>31 sivua 24.05.2016</p>
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI, tuotantopainotteinen
Ohjaajat	DI Esko Kaappola yliopettaja Aki Valkeapää
<p>Tässä insinöörityössä tarkastellaan luonnollisen kylmäaineen hiilidioksidin (CO₂, R744) ominaisuuksia, luodaan katsaus CO₂:n käytön historiaan ja tarkastellaan sen käyttöä kauppan kylmässä. Päähuomio tarkastelussa tulee olemaan nykyisin eniten käytetyssä booster-kytkennässä.</p> <p>Kylmäalan tukkukaupan Combi Cool:in koulutuspäivät tammikuussa 2016 tarjosivat uutta tietoa ja uusia ratkaisuja CO₂-kylmälaitoksiin. Koulutuspäiviltä sain insinöörityötä varten tärkeää tietoa eri laitostyypeistä, kuten kaskadi- ja booster-laitoksista, sekä niissä käytetyistä pääkomponenteista, kuten automatiikasta (Danfoss), kompressoreista (Bitzer) sekä höyrystymistä ja kaasunjäähdyttimistä (Alfa Laval).</p> <p>Lisäksi keskustelut DI Esko Kaappolan kanssa antoivat arvokasta tietoa tähän työhön.</p> <p>Tarkastelun tavoitteena on, että toimeksiantajani HOK-Elanto saa uusia ratkaisuja, joilla säästää jäähdytykseen käytettävää energiaa lähinnä S-market-kokoluokan (1 500–2 000 m²) myymälöissä.</p> <p>CO₂-kylmäkoneiston kylmätehon tarvetta arvioitaessa eritellään kesä- ja talvilämpötilojen vaikutus laitoksen mahdollisemman energiatehokkaaseen toimintaan. Laitos voi toimia joko alikriittisenä tai ylikriittisenä ympäristön lämpötilasta riippuen ja tässä työssä pyritään selvittämään järkevä koneiston mitoitus ja tehonsäätö vuodenaika ja ympäristön lämpötila huomioiden.</p> <p>Myymälän kokonaishyötysuhteen kannalta lämmöntalteenoton optimointi on tärkeää. Tämän takia tässä työssä tarkastellaan myös myymälän kylmäkoneistosta syntyvää lauhdelämmön määrää ja sen käyttömahdollisuuksia. Lauhdelämmön talteenotossa ongelmana on, että saatavuus ja tarve eivät kohtaa kesä- ja talvilämpötiloissa.</p>	
Avainsanat	hiilidioksidi, CO ₂ , booster, kaskadi, alikriittinen, ylikriittinen

Author Title	Mikko Muuronen Carbon dioxide (CO ₂) usage as a refrigeration system and sizing of a refrigeration facility
Number of Pages Date	31 pages 24 May 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering, Production Orientation
Instructors	Esko Kaappola, Master of science Aki Valkeapää, Principal lecturer
<p>This Bachelor's thesis examined the qualities and applications of carbon dioxides's (CO₂ R744) in refrigeration technology and surveyed the history of CO₂ refrigeration usage. The purpose was to create a comprehensive report of the utilization and problems concerning CO₂ as a refrigerant. The goal of the project was to provide a client with adequate information about the cooling power required for a 1 500-2 000 m² grocery store. The final year project studied the adjustment of cooling power and condenser heat recovery which determine the coefficient of performance of a store.</p> <p>Information about solutions with CO₂ as a refrigerant was collected at a trade event about refrigeration systems such as CO₂ cascades, booster systems and gas coolers. In addition, conversations with an expert in the field gave precious information. Also, the energy consumption of the refrigeration system in a store was followed and information about refrigeration systems gathered from different device manufacturers.</p> <p>The information provided by the thesis enables the client to optimize the source for refrigeration of similar sized grocery stores in the future.</p>	
Keywords	carbon dioxide, CO ₂ , refrigeration technology, subcritical, transcritical

Sisällys

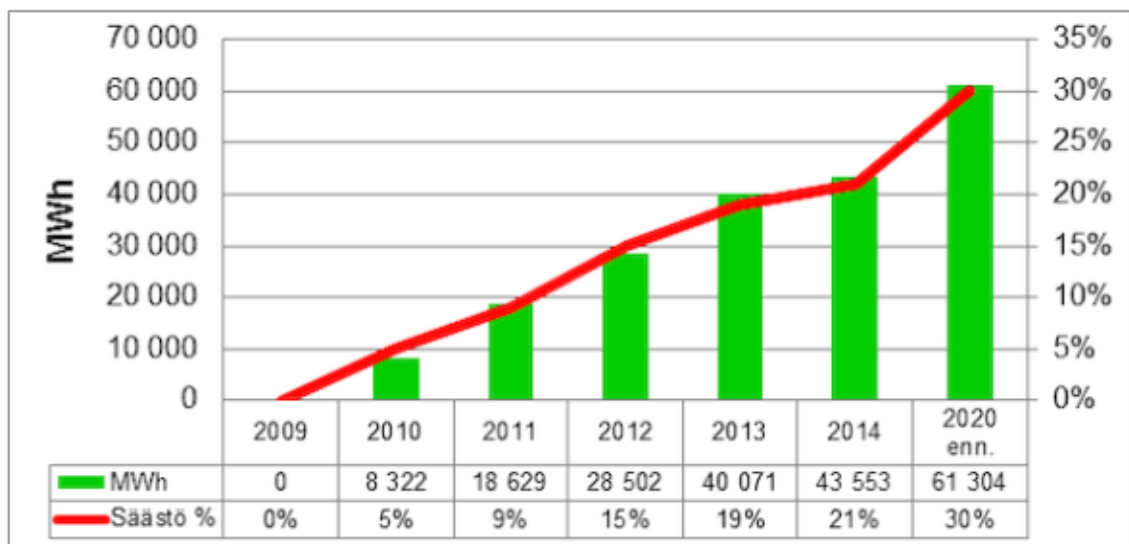
1	Johdanto	1
2	CO ₂ kylmäaineena	2
2.1	CO ₂ -kylmäaineen historia	2
2.2	CO ₂ -kylmäaineen ominaisuudet	4
2.3	Hiilidioksidin olomuodot	4
2.4	CO ₂ :n turvallisuuskäsitelmä	7
2.5	Ympäristövaikutukset	9
3	CO ₂ -kylmäprosessit	10
3.1	Alikriittinen kylmäprosessi	11
3.2	Ylikriittinen kylmäprosessi	12
3.3	Huomioitavaa CO ₂ -kylmäaineen käytössä	13
4	CO ₂ :n kehitysnäkymät	15
4.1	CO ₂ -järjestelmät	15
4.1.1	CO ₂ -kaskadikoneisto	16
4.1.2	CO ₂ -boosterikoneisto	17
4.1.3	Boosterikoneisto kaasunohituksella	19
4.1.4	CO ₂ -koneiston rinnakkainen puristus	20
4.1.5	CO ₂ -ejektorit	22
4.1.6	Uusien laitostekniikoiden energiansäästöpotentiaali	24
4.2	Lauhdelämmön talteenotto	25
4.3	Korkeapaineen vaikutus ylikriittisen koneiston hyötysuhteeseen	26
5	Referenssikohteen tutkimus	27
5.1	Referenssikohde	27
5.2	Energiatehokkuus nykyaikaisissa elintarvikemyymälöissä	28
5.2.1	Kylmätekniikka ja kylmäkalusteet	28
5.2.2	Elintarvikkeiden myynti- ja säilytyslämpötilat	28
5.3	Jäähdytystehontarpeet myymälöissä	29
5.4	Kylmäkoneistojen simulointi	29
5.4.1	Sisäilmaolosuhteet	30

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoite on, että toimeksiantaja HOK-Elanto saa uutta tietoa uusista hiilidioksidia kylmäaineena käyttävistä laitosratkaisuista S-market kokoluokan elintarvikemyymälöissä. Tarkastelussa keskitytään kylmälaitoksen (kompressorikoneikko) optimaaliseen mitoittamiseen huomioiden ympärivuotiset ilmasto-olosuhteet.

Tilaaja HOK-Elanto on pääkaupunkiseudulla sijaitseva osuuskauppa, jonka omistajina toimii yli 600 000 asiakasomistajataloutta. HOK-Elanto on S-ryhmän suurin alueosuuskauppa, jossa on henkilökuntaa yli 6200 työntekijää ja vuosittainen liikevaihto on yli 1,9 miljardia. [1]

Useat elintarvikkeet vaativat säilyäkseen jäähdytystä. Vastuullisena toimijana HOK-Elannon tavoitteena on kehittää S-market-ketjulleen mahdollisimman energiatehokkaat, ympäristöystävälliset ja turvalliset jäähdytyskoneistot, joiden vuosihyötysuhde olisi mahdollisimman hyvä. Kuvassa 1 näkyy kuinka ”HOK-Elannon tavoitteena on tehostaa energian käyttöä 30% vuoteen 2020 mennessä vuoden 2009 energiamäärään verrattuna.” [14]



Kuva 1. HOK-Elannon energian säästötavoite [14]

Referenssikohteena toimii S-market Nihtisilta, jonka jäähdytys tuotetaan CO₂-kylmäkoneistolla. HOK-Elannon teknisten kylmäpalveluiden yksikön päällikkö Mikko Keitaanranta on auttanut työssä luovuttamalla teknistä tietoa ja erilaisia mittaustuloksia Nihtisillan kylmälaitoksen toiminnasta.

Tarkoitus on, että seuraavaksi rakennettavaan samaa kokoluokkaa olevaan S-marketin kylmäkoneiston suunnittelussa ja mitoituksessa voidaan hyödyntää tämän selvityksen tuloksia.

2 CO₂ kylmäaineena

Viime vuosien aikana hiilidioksidista on tullut käytetyin kylmäaine kaupan kylmässä tässä kokoluokassa. Tähän on syynä hiilidioksidin ympäristöystävällisyys ja turvallisuus. Hiilidioksidi on myös ns. pitkän aikavälin kylmäaine eli sen käytölle ei ole näkyvissä rajoitteita eikä kieltoja tulevaisuudessa.

Hiilidioksidia on luonnollisesti maapallon ilmakehässä noin 0,04 % eli 400 ppm ilmakehän tilavuudesta. Ilmakehän paineessa CO₂:lla on vain kaksi olomuotoa kaasuna ja kiinteänä. [2]

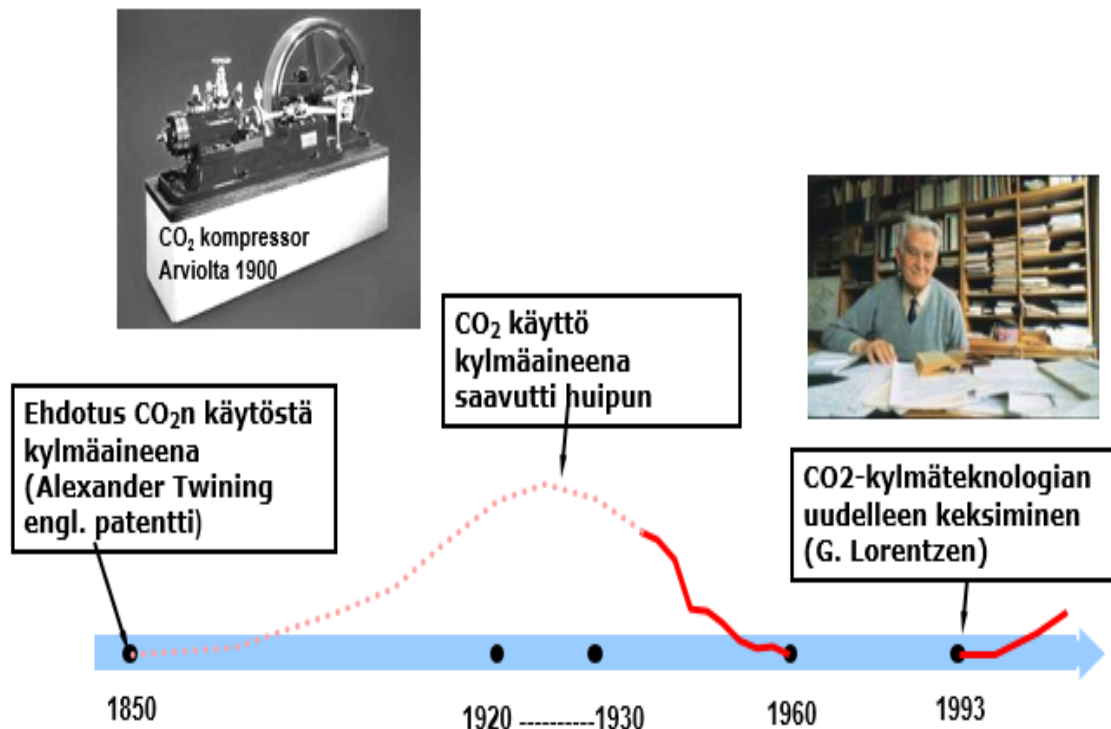
Yli 5.2 baarin (bar) paineessa CO₂ esiintyy kiinteänä ja höyryn lisäksi myös nesteinä ja kylmäaineena sitä käytetään yleensä varsin korkeissa paineissa. CO₂:n ominaisuudet mahdollistavat halkaisijaltaan pienien kupariputkien käytön, joka säästää materiaalia sekä asennuskustannuksissa. [2]

2.1 CO₂-kylmäaineen historia

Erilaisia jäähdytysjärjestelmiä on käytetty 1600-luvulta asti. 1850-luvulla Alexander Twining sai ehdotuksen hiilidioksidin CO₂:n käytöstä kylmäaineena patentoitua. CO₂-kylmäaine saavutti käyttönsä huipun 1920–1930-luvulla, jolloin sitä hyödynnettiin varsinkin laivateollisuuden kylmäkoneistoissa. Kuitenkin CO₂:n ominaisuuksien tuomien ongelmien takia alkoivat yleistyä synteettiset kylmäaineet (halogenoidut hiilivedyt), kuten CFC R12, CFC R502 ja HCFC R22. [3, s.1.]

Edellä mainituilla kaasuilla on negatiivinen vaikutus otsonikerrokseen (otsonikato) ja kumpikin ovat lisäksi kasvihuonekaasuja. EU:ssa synteettiset CFC-aineet ovat olleet kiellettynä jo vuodesta 1995 lähtien, ja uusia ympäristöystävällisempiä ja kestäviä kylmäaine vaihtoehtoja on tutkittu ja kehitetty. CO₂ ei kuormita ilmakehää ja sen kasvihuonevaikutus (GWP = Global Warming Potential) on minimaalinen verrattuna esimerkiksi HFC- kylmäaineisiin. [4]

Hiilidioksidi tunnetaan "uusvanhana" kylmäaineena sillä, Esko Kaappolan sanoin "tämä kylmäaine uinui Ruususen unta yli kolme vuosikymmentä" ennen kuin se keksittiin ottaa uudestaan käyttöön kylmäaineena. Vuonna 1993 norjalainen professori Gustav Lorentzen alkoi uudelleen tutkimaan CO₂:n ominaisuuksia kylmätekniikassa, ja hän patentoi lukuisia hiilidioksidiin ja kylmäjärjestelmiin liittyviä teknologioita (kuva 2). [3, s.1.]



Kuva 2. CO₂:n kylmäaineena käytön historia [3, s.1]

2.2 CO₂-kylmäaineen ominaisuudet

CO₂:lla on kylmäaineena melko samanlaisia ominaisuuksia kuin muillakin tavanomaisilla kylmäaineilla. Suurimmat erot löytyvät kylmäaineen olomuodoista, sillä CO₂ ei esiinny nestemäisessä olomuodossa ilmakehässä, vaan se vaatii yli 5,2 bar:n paineen muuttuakseen nestemäiseen olomuotoon. CO₂ voi esiintyä kiinteässä olomuodossa, ja siksi sen käyttö vaatii erityishuomiota suunnittelussa ja kylmälaitoksen käytössä ja huollossa. [5]

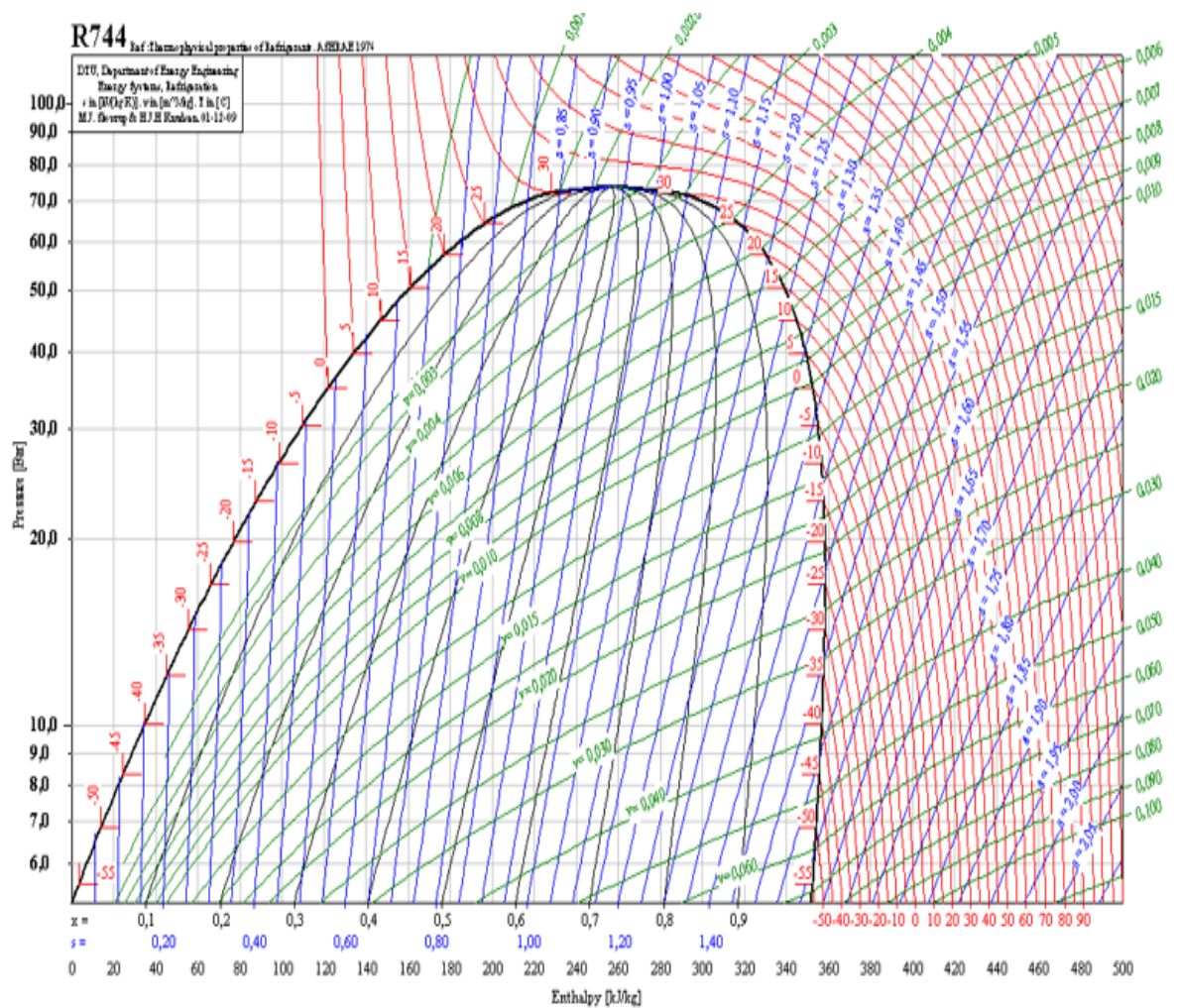
Hiilidioksidin parhaat ominaisuudet ovat sen ympäristöystävällisyydessä, sillä se ei vaikuta ilmakehän otsonikerrokseen ja sen kasvihuonepäästöt ovat minimaaliset. Global Warming Potential eli GWP-arvo kuvaa kylmäaineiden vaikutusta kasvihuoneilmiöön, joka CO₂:n kohdalla on 1. [6, s. 2.]

Hiilidioksidin korkeat toimintapaineet kylmäkoneistoissa vaativat tarkkaa suunnittelua ja kestäviä komponentteja, mutta ympäristöystävällisyytensä ja kestävyytensä vuoksi CO₂:n käyttö tulee edelleen yleistymään. Sen takia CO₂-järjestelmiä ja komponentteja on pyritty kehittämään ja mahdollistaan sen käyttö mahdollistamaan erityyppisissä kylmälaitoksissa. [5]

2.3 Hiilidioksidin olomuodot

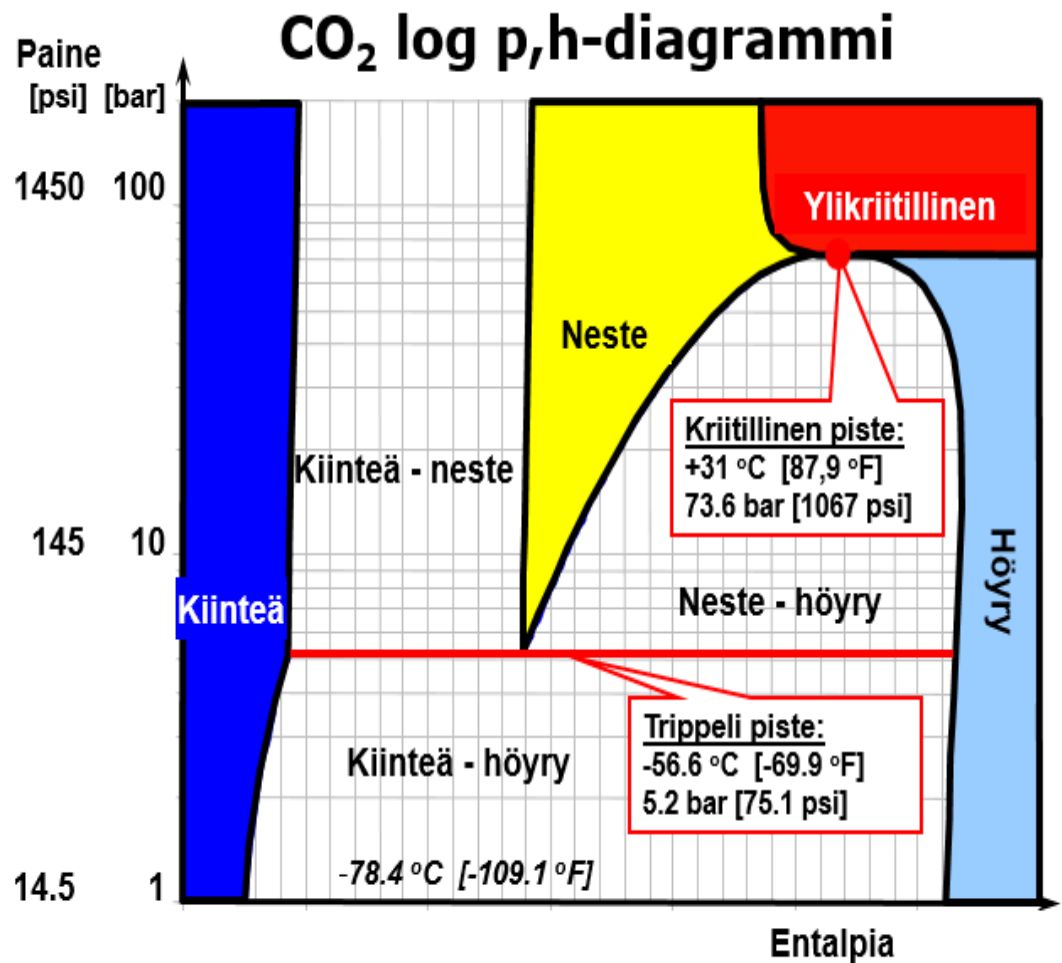
CO₂:n log p, h -tilapiirros

Kuvassa 3 hiilidioksidin log p, h -tilapiirroksista voi huomata joitakin CO₂-kylmäaineen erityisominaisuuksia. Log p, h -tilapiirros kuitenkin näyttää melko samanlaiselta kuin muidenkin kylmäaineiden tilapiirrokset.



Kuva 3. CO₂ (R744) Kylmäaineen Log p, h -tilapiirros [3, s. 2]

Hiilidioksidin log p, h -tilapiirros alkaa usein paineasteikossa arvosta 6 bar, koska kylmäaineella ei ole nestemäistä olomuotoa alle 5,2 bar:n paineissa. Korkean paineasteikon lisäksi CO₂:n log p, h -tilapiirroksessa voi huomata, että matalissa höyrystymislämpötiloissa kylmäntuotto on tavanomaisia kylmäaineita parempi. [3, s. 2.]



Kuva 4. CO₂-kylmäaineen käyttäytyminen [7, s. 4]

Tavallisissa käyttöolosuhteissa hiilidioksidilla on samat olomuodot (neste, höyry ja niiden seos) kuin muillakin tavanomaisilla kylmäaineilla. Hiilidioksidi voi toimia myös ylikriittisellä alueella, jolloin sitä kutsutaan fluidiksi. Häiriötilanteissa hiilidioksidin olomuoto voi olla myös kiinteä.

Kylmäaineen olomuotoon voidaan vaikuttaa lämpötilalla ja paineella. Näiden neljän olomuodon lisäksi CO₂ esiintyy tilapiirroksessa eri faasiseoksina (kuva 4). Log p, h -diagrammissa kylläisen nesteen ja höyryn välissä ja trippelipisteen yläpuolella, kylmäaine on neste-höyry seosta, kun taas yli 5,2 bar:n paineessa ja alhaisemmissa lämpötiloissa kylmäaine voi olla kiinteä-neste seosta. Alle 5,2 bar:n paineessa esimerkiksi ilmanpaineessa (noin 1 bar) hiilidioksidi ei koskaan esiinny nestemäisessä olomuodossa, vaan

pelkästään kiinteänä, nesteinä tai näiden seoksena. Tämän takia alle 5,2 bar:n paineessa kiinteä hiilidioksidi muuttuu suoraan höyryksi. [3, s.3]

Log p, h -tilapiirroksista voi huomata melko matalan kriittisen pisteen, joka on CO₂-kylmäaineessa + 31 °C lämpötilassa 73,6 bar:n paineessa. Kriittisessä pisteessä kylmäaine voi olla kolmessa eri olomuodossa: nestemäisenä, ylikriittisessä tai höyryolomuodoissa. Kriittisessä pisteessä kylmäaineen neste ja höyry olomuotojen raja-arvot ja tiheydet ovat lähellä toisiaan. Paineen noustessa kylmäaine menee ylikriittiselle alueelle, jossa kylmäaine ei enää esiinny neste tai höyry olomuodoissa. Sen takia yli + 31 °C:n lämpötilassa kylmäainetta ei enää saa neste-olomuotoon painetta nostettaessa, sillä se muuttuu höyrystä niin sanotuksi fluidiksi. [3, s. 3.]

CO₂-kylmäaineen lämpötilan laskiessa - 56.6 °C:seen ja paineessa 5.2 bar saavutetaan trippeli-piste, jossa kylmäaine voi esiintyä höyry, neste tai kiinteä olomuodossa. Aivan kuten kriittisessä pisteessä, olomuotojen raja-arvot ja tiheydet ovat lähellä toisiaan. Log p, h -diagrammissa trippeli-pisteen yläpuolella kylmäaine voi olla nestettä, mutta alapuolella, jolloin ollaan alle 5.2 baarin paineessa, kylmäaine ei enää nesteydy. [3, s. 3.]

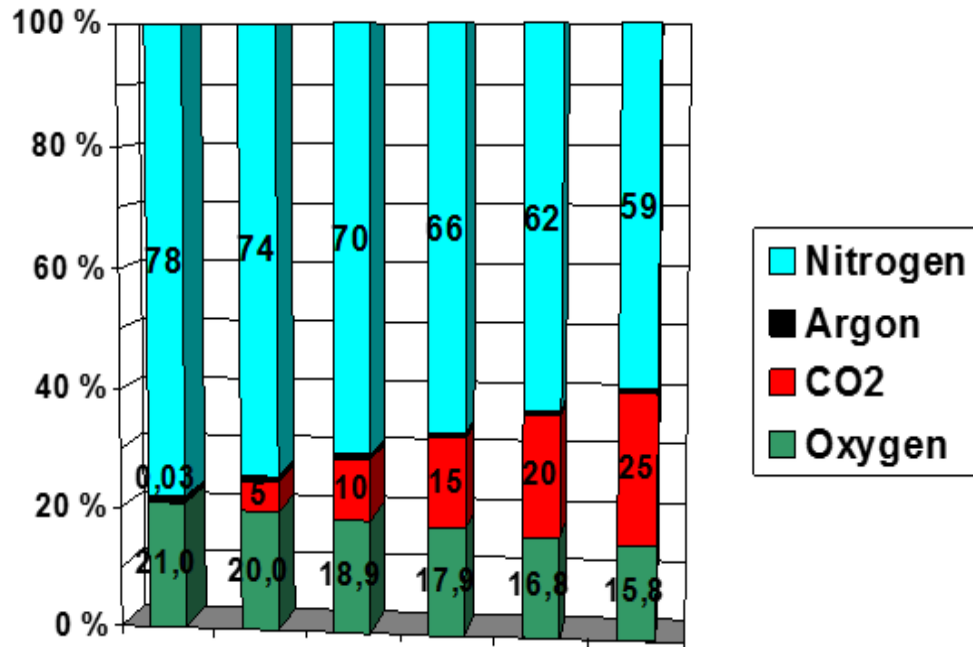
2.4 CO₂:n turvallisuusnäkökulma

CO₂:n edut kylmäaineena, verrattuna moneen muuhun kylmäaineeseen, ovat sen palamattomuus ja myrkyttömyys, mutta väärinkäytettynä se voi olla tappava käyttäjälleen. ”Hiilidioksidi on luokiteltu EN 378:n mukaan ryhmiin A1/L1 (vain hieman myrkyllinen ja ei palava.)” Hiilidioksidi on 2. turvallisuusluokan kylmäaine, ja hiilidioksidilla ei ole tavanomaisiin kylmäaineisiin verrattuna turvallisuusriskejä, jotka vaatisivat ennakkotoimia. [7, s. 9.]

Riskitekijänä on hiilidioksidin narkoottinen vaikutus suurilla pitoisuuksilla. Olosuhteet, kuten hiilidioksidin pitoisuus ja altistumisen kesto määrittävät, kuinka vaarallinen hiilidioksidi voi ihmiselle olla. Korkea hiilidioksidipitoisuus voi aiheuttaa terveysriskejä, kuten hengitysvaikeuksia tai yskimistä. Hiilidioksidin happomaisen ominaisuuden takia hengityselimissä ja silmissä voi esiintyä myös ärsytystä. [3, s. 1.]

Vaarana hiilidioksidissa on sen hajuttomuus, joten vuodon tapahtuessa sitä ei välttämättä lyhyessä ajassa huomaa aistimalla. Tästä syystä CO₂-koneistoissa pitää olla

asennettuna hiilidioksidivaroitin mahdollisen vuodon varalle. Pelkkä happipitoisuuden mittaaminen ei riitä CO₂-koneiston turvajärjestelmänä, hiilidioksidin narkoottisen vaikutuksen takia. [7, s. 10.]



Kuva 5. Happipitoisuuden väheneminen CO₂ laitoksessa [7, s. 10]

Hiilidioksidipitoisuuden noustessa yli turvallisten rajojen, aiheuttaa se ihmisissä monia fyysisiä oireita. Fyysiset oireet määrittää hiilidioksidi pitoisuus ja altistumisen kesto, mutta korkeissa hiilidioksidi pitoisuuksissa jo lyhyt altistuminen voi olla kohtalokas. Hiilidioksidi pitoisuuksia voidaan tarkastella seuraavasti ihmisten turvallisuuskulmasta. [12]

- 370 ppm (0,037 %) Hiilidioksidipitoisuus maapallon ilmakehässä.
- 5.000 ppm (0,5 %) Hiilidioksidipitoisuus on ylittänyt kaasuvuodon ylärajan, ja välitön ihmisten evakuointi tulee suorittaa.
- 20.000 ppm (2 %) Pitkäaikainen hiilidioksidille altistuminen aiheuttaa terveydellisiä oireita, mutta lyhyestä altistumisesta ei vielä ongelmia ihmiselle.

- 30.000 ppm (3 %) Hiilidioksidipitoisuus vaikuttaa hengitykseen ja pulssiin, sekä hiilidioksidin narkoottinen vaikutus aiheuttaa tajunnan hämärtymistä.
- 40.000 ppm (4 %) Hiilidioksidipitoisuus aiheuttaa välittömän hengen vaaran.
- 100.000 ppm (10 %) Hiilidioksidi aiheuttaa hengenahdistusta, tukehtumisen tunnetta sekä tokkuraista oloa, joka johtaa noin 15 minuutin kuluttua tajuttomuuteen ja kuolemaan.

[7, s. 10; 12.]

2.5 Ympäristövaikutukset

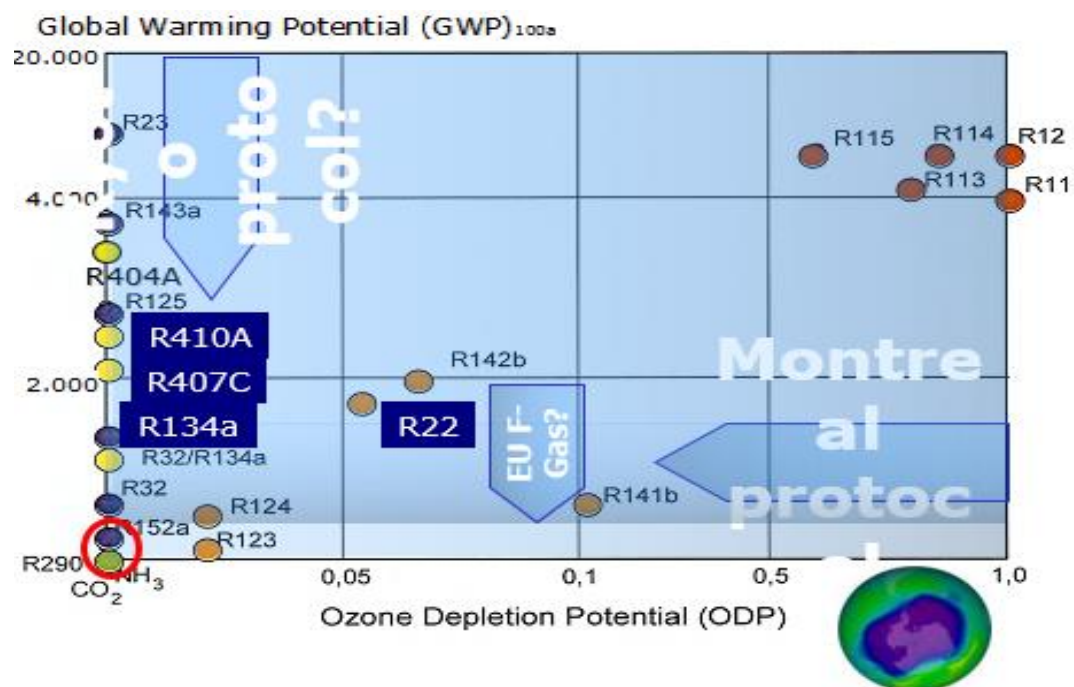
Ilmaston lämpeneminen eli niin sanottu "kasvihuoneilmiö ja otsonikato" on saanut alkunsa ihmisten tuottamien kasvihuonekaasujen päästämisestä ilmakehään. Näitä ilmakehää kuormittavia kasvihuonekaasuja ihmiset tuottavat päivittäin. Suorat vaikutukset kasvihuoneilmiöön voivat olla ilmakehää kuormittavan aineen vuotaminen, kun taas epäsuoria vaikutuksia voivat olla esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden käyttö energian lähteenä. Kylmätekniikka ja erilaiset kylmäkoneistot ovat olleet yksi ilmakehää kuormittava tekijä niin vuotojen, kuin myös huolimattomasti hävitettyjen kylmäaine-jätteiden takia. [6, s.1]

Synteettiset kylmäaineet, kuten CFC- ja HCFC-kylmäaineet heikentävät maapallon ilmakehän otsonikerrosta. Molemmat ovat myös kasvihuonekaasuja ja varsinkin CFC-kylmäaineella on suuri otsonikerrosta heikentävä vaikutus. CFC-kylmäaineet (esim. R12 ja R502) ovat olleet kiellettyinä jo 1995-luvulta saakka EU:ssa, ja HCFC-kylmäaineita (esim. R22) ei enää 2000-luvun jälkeen ole saanut käyttää uusissa kylmäkoneistoissa. [6, s. 1.]

Luonnonmukaisten kylmäaineiden GWP (Global Warming Potential) on lähellä nollaa. Hiilidioksidin lisäksi luonnollisia kylmäaineita ovat HC-aineet eli hiilivedyt, joista kylmäaineena käytetään propaania (R290) ja isobutaania (R600). Nämä ovat kuitenkin palavia aineita, joten niiden käyttöä on rajoitettu. [8]

Hiilidioksidi sopii kylmäaineeksi ominaisuuksien puolesta ja sen on ympäristöystävällinen vaihtoehto. Hiilidioksidin GWP-arvo on 1, joten sen vaikutus kasvihuoneilmiöön on todella vähäinen. [6, s. 2.]

Ympäristöystävällisyys on muuttunut osaksi yritysmaailmaa, sillä ”vihreän imagon merkitys kasvaa” ja yritysten tavoite on saada hiilijalanjälki eli toiminnan tai tuotteen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt mahdollisimman alhaiseksi. Kylmätekniikassa pyritään myös pienentämään hiilijalanjälki mahdollisimman pieneksi, ja siksi hiilidioksidista on tullut kestävä (pienet suorat ja epäsuorat vaikutukset) kylmäaine. Hiilidioksidia voidaan markkinoida erittäin ympäristöystävällisenä ja luonnonmukaisena kylmäaineena. Kylmäaineiden vaikutusta ilmastoon lämpenemiseen ja otsonikatoon voidaan tarkastella kuvan 6 diagrammista, jossa eri kylmäaineiden (HFC, HCFC, HFC ja HC) GWP- ja ODP- (Ozone Depletion Potential) arvot ovat vertailussa. [13]



Kuva 6. Eri kylmäaineiden GWP ja ODP-diagrammi ympäristön lämpötilassa 32 °C [17]

3 CO₂-kylmäprosessit

Lämmön sitomisprosessi voidaan määritellä seuraavasti:

Lämmön sitomisprosessia (trippeli-pisteen yläpuolella) kutsutaan höyrystymiseksi, ja se tapahtuu höyrystimessä. [3, s. 8.]

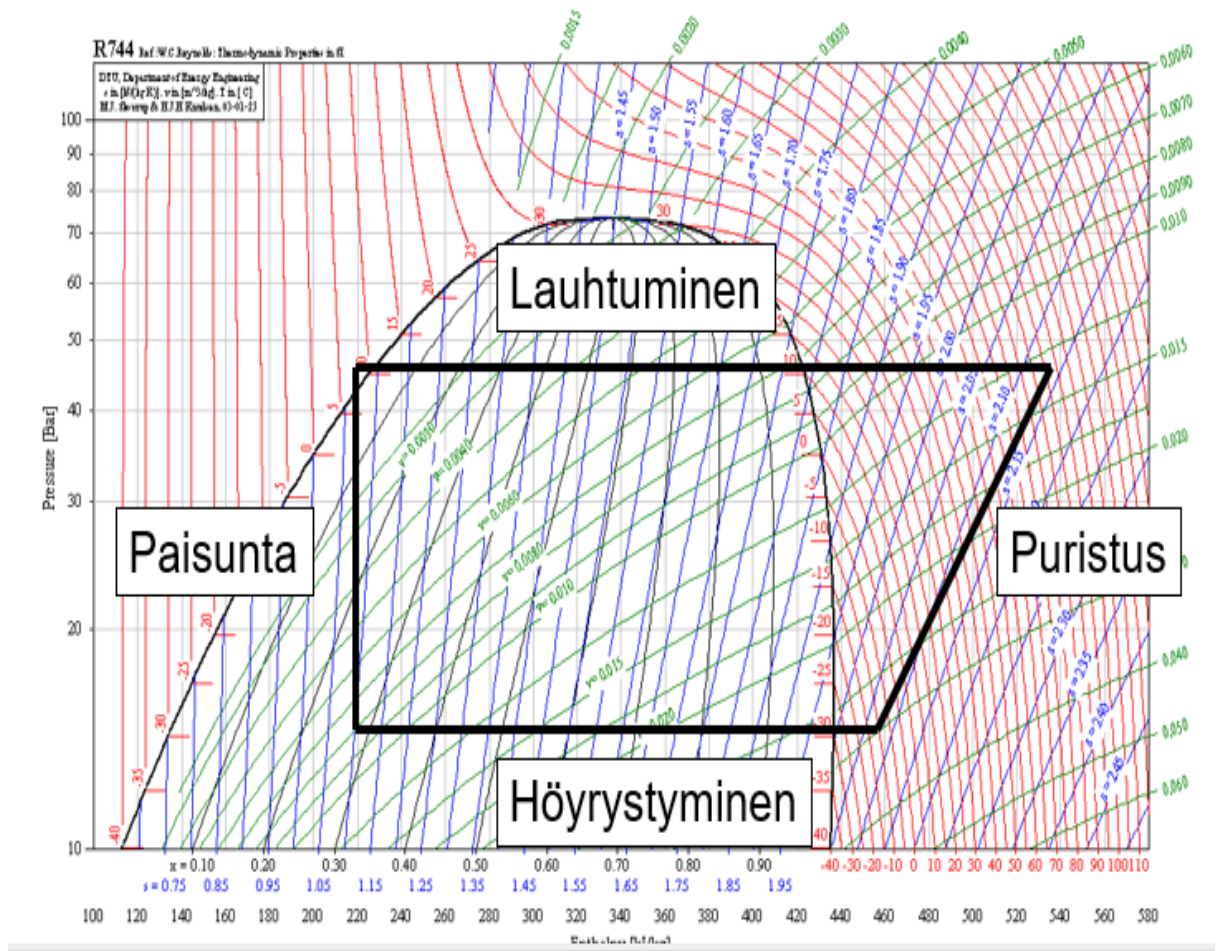
Lämmön luovutusprosessi voidaan määritellä seuraavasti:

Lämmön luovutusprosessia, mikä tapahtuu kriittisen lämpötilan alapuolella, kutsutaan lauhtumiseksi, mikä tapahtuu lauhduttimessa. Kriittisen lämpötilan yläpuolella prosessia kutsutaan kaasun jäähdyttämiseksi, mikä tapahtuu kaasun jäähdyttimessä. [3, s. 8.]

CO₂:lla on kaksi kylmäprosessia, jotka voivat toimia ali- tai ylikriittisenä kylmäprosessina. Kylmäprosessi on alikriittinen, kun log p, h -tilapiirroksessa prosessi tapahtuu kriittisen pisteen alapuolella ja kylmäaine lauhtuu. Prosessin ylittäessä kriittisen pisteen muuttuu prosessi ylikriittiseksi, jolloin kaasua jäähdytetään. [3, s. 8.]

3.1 Alikriittinen kylmäprosessi

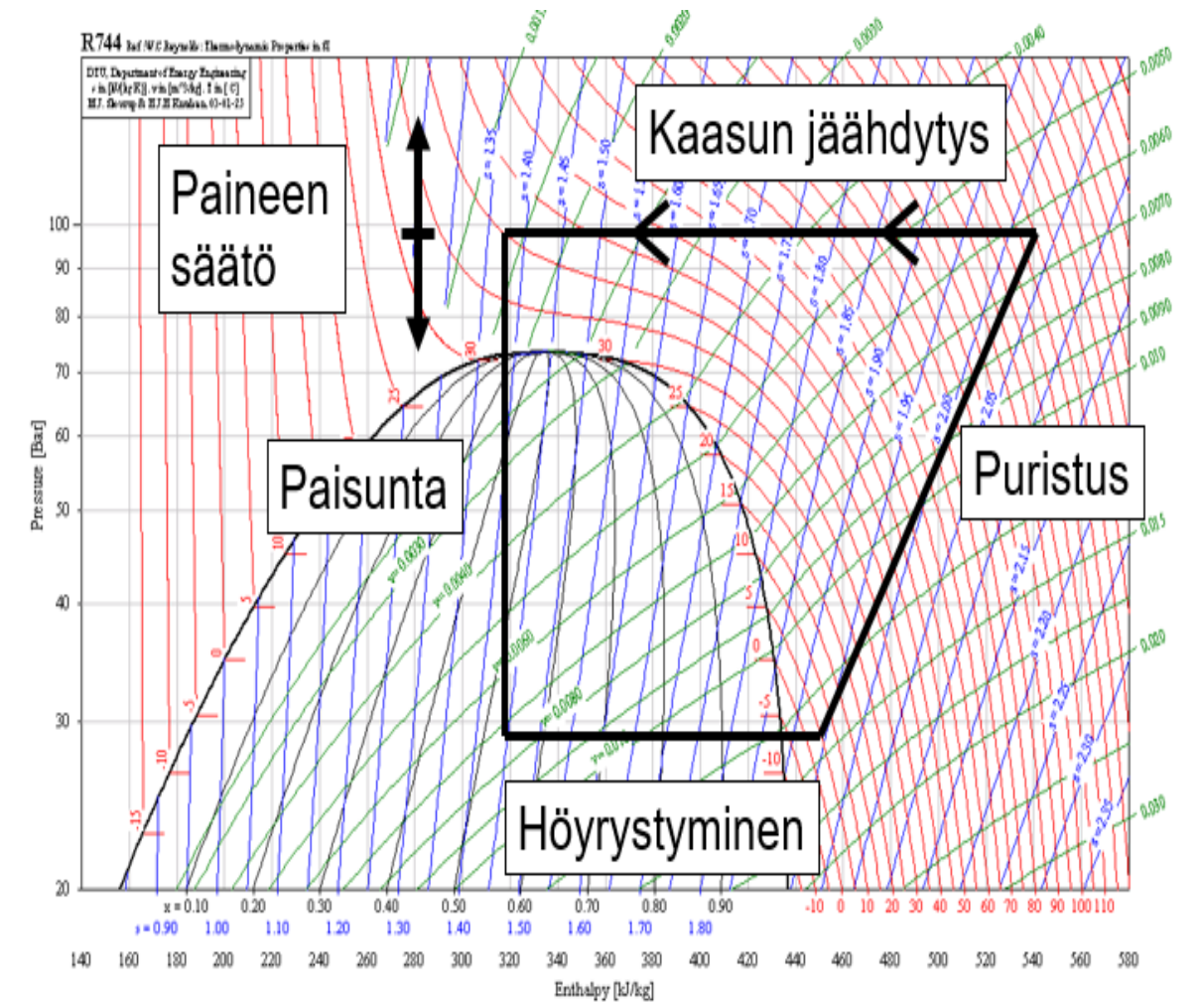
CO₂-alidikriittisiä kylmäprosesseja (kuva 7), jotka perustuvat kylmäaineen lauhtumiseen, käytetään esimerkiksi kaskadikoneistoissa ja pumppukierroksissa koneissa (pumpattu CO₂). Näiden lisäksi alidikriittistä kylmäprosessia käytetään kylmä- ja pakkastiloissa esimerkiksi suora- ja epäsuorissa kaskadikoneistoissa. Muita alidikriittisillä järjestelmillä jäähdytettäviä kohteita ovat esimerkiksi tekojääradat ja hiihtotunnelit. [3, s. 9.]



Kuva 7. Alikriittinen kylmäprosessi log p, h -tilapiirroksessa [7, s.5]

3.2 Ylikriittinen kylmäprosessi

Ylikriittisiä CO₂-kylmäprosesseja (kuva 8), jotka perustuvat kaasun jäähdyttämiseen, käytetään elintarvikemyymälöiden ja teollisuuden (prosessijäähdytys, kylmä- ja pakkasvarastot) kylmälaitoksissa. Ylikriittiset kylmäprosessit sopivat hyvin lämpimiin maihin, jossa ulkolämpötilat ovat korkeita. Pohjoisen viileimmissä ympäristön lämpötiloissa kylmäprosessit voivat toimia myös alikriittisenä. Ylikriittisiä kylmäprosesseja käytettiin ennen kaupan kylmäjärjestelmiä esimerkiksi autojen ilmastoinnin jäähdytyslaitteissa ja lämpöpumpuissa. [3, s. 9.]



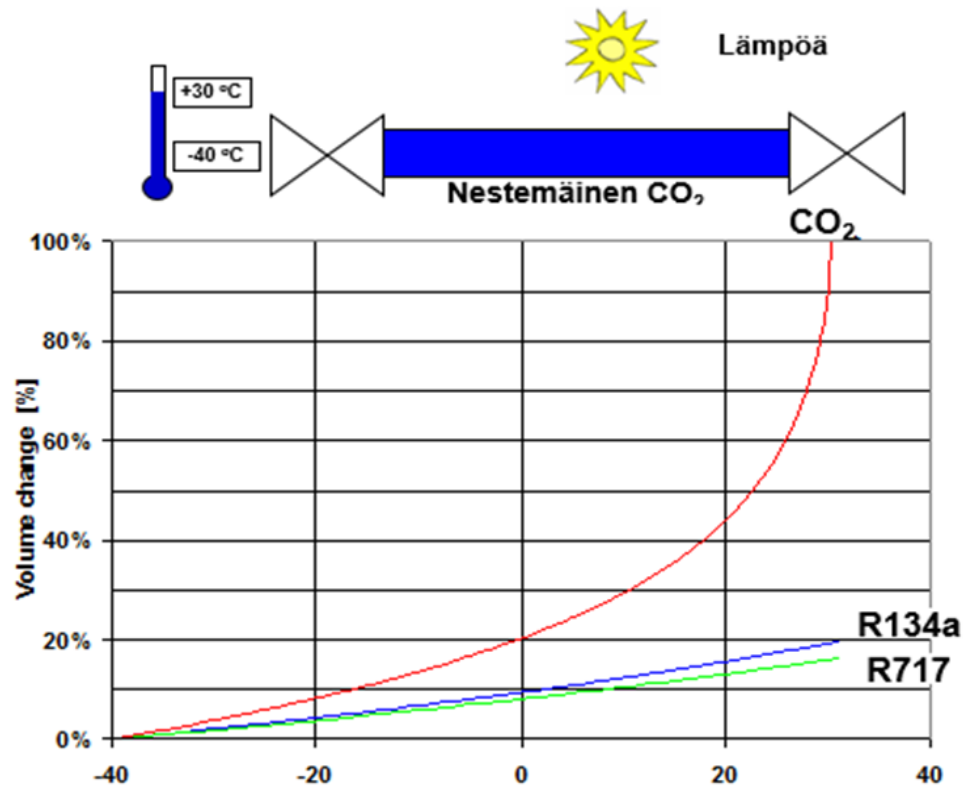
Kuva 8. Ylikriittinen kylmäprosessi [7, s. 6]

3.3 Huomioitavaa CO₂-kylmäaineen käytössä

Hiilidioksidin käyttö kylmäaineena vaatii tarkkaa suunnittelua ja tietoa kylmäaineen ominaisuuksista ja käyttäytymisestä eri lämpötiloissa sekä paineissa. Kylmäaineen käytön ongelmina voidaan pitää kosteusherkkyyttä ja hiilidioksidin mahdollista kiinteytymistä alle 5,2 baarin paineessa. Kiinteytyminen tuo haastetta kylmäkoneikon täytölle ja tyhjentämiselle. Suunnittelussa kylmäaineen erityisominaisuudet pitää ottaa myös huomioon eri kylmäkoneiston osissa, kuten ohjaus- ja varolaitteissa, putkien mitoituksessa ja reitityksessä sekä varoventtiilin sijainnin valitsemisessa. [3, s. 3.]

CO₂-kylmäaineen lisäksi kylmäkoneistossa kiertää öljyä, jolloin kylmäaineen ja öljyn tiheys vaihtelee kylmäkoneistossa eri lämpötiloissa ja paineissa. Suunnittelussa pitää ottaa myös huomioon nesteen ja höyryn tiheydet eri lämpötiloissa. Tarkoituksena on välttää öljyn jääminen nesteen pinnalle tai kylmäkoneiston säiliön pohjaan liiallisen tiheys-eron takia. [3, s. 4.]

CO₂-kylmäkoneiston suunnittelussa tulee myös varoa, ettei nestettä tai höyryä jää "loukkuun" venttiilien väliin. Kun CO₂-neste lämpenee – 40 °C:sta + 30 °C:seen, laajenee sen tilavuus 100 %. Hiilidioksidin tilavuus siis kaksinkertaistuu kyseisen lämpötilamuutoksen aikana. Vertailun vuoksi tavanomaiset kylmäaineet laajenevat huomattavasti vähemmän lämpötilan vaikutuksesta. Esimerkkinä kylmäaineet HFC R134a ja R717 (ammoniakki) laajenevat saman lämpötilamuutoksen aikana noin 20 % ja 15 % alkuperäisestä tilavuudesta (kuva 9). Kylmäkoneistoa huoltaessa tai vikatilanteessa lämpötilan äkillinen nousu aiheuttaa myös paineen nousun, jos kylmäainetta on jäänyt "loukkuun." Sen takia kylmäkoneistoon on asennettava varoventtiileitä, jotka aukeavat järjestelmän paineen ylitäessä varoventtiilille säädetyn aukeamispaineen. Tällöin varoventtiili pyrkii tasaamaan paineen, kunnes se on riittävän alhainen. Varoventtiilit eivät kuitenkaan toimi kaikissa sijoituspaikoissa, sillä kylmäaine tukkii varoventtiilin tai ulospuhallusputken, jos sen olomuoto muuttuu kiinteäksi. [3, s. 4.]



Kuva 9. Kylmäaineiden laajentuminen lämpötilan muutoksessa [3, s.4]

4 CO₂:n kehitysnäkymät

CO₂-jäähdytysteknologiaa kehitetään jatkuvasti, sillä se on monesta näkökulmasta katsoen parempi kuin perinteelliset kylmäaineet. Paremmuutta voidaan perustella esimerkiksi tehokkuudella, ympäristöystävällisyydellä, turvallisuudella sekä edullisuudella. Kuitenkin kylmätehon tarve vaihtelee käyttötarkoituksesta riippuen ja saattaa olla suurin vaikuttava tekijä kylmäaineen valinnassa. Kaupan- ja teollisen kylmän laitoksissa CO₂ on yleistynyt ja myös lämpimissä maissa. CO₂:n ns. kannattavuusraja on siirtynyt vuosien saatossa yhä etelämmäksi (korkeat ulkolämpötilat). CO₂-kylmäkoneistojen vuosihyötysuhde on saatu jopa paremmaksi esimerkiksi verrattuna HFC-koneistoihin. [8]

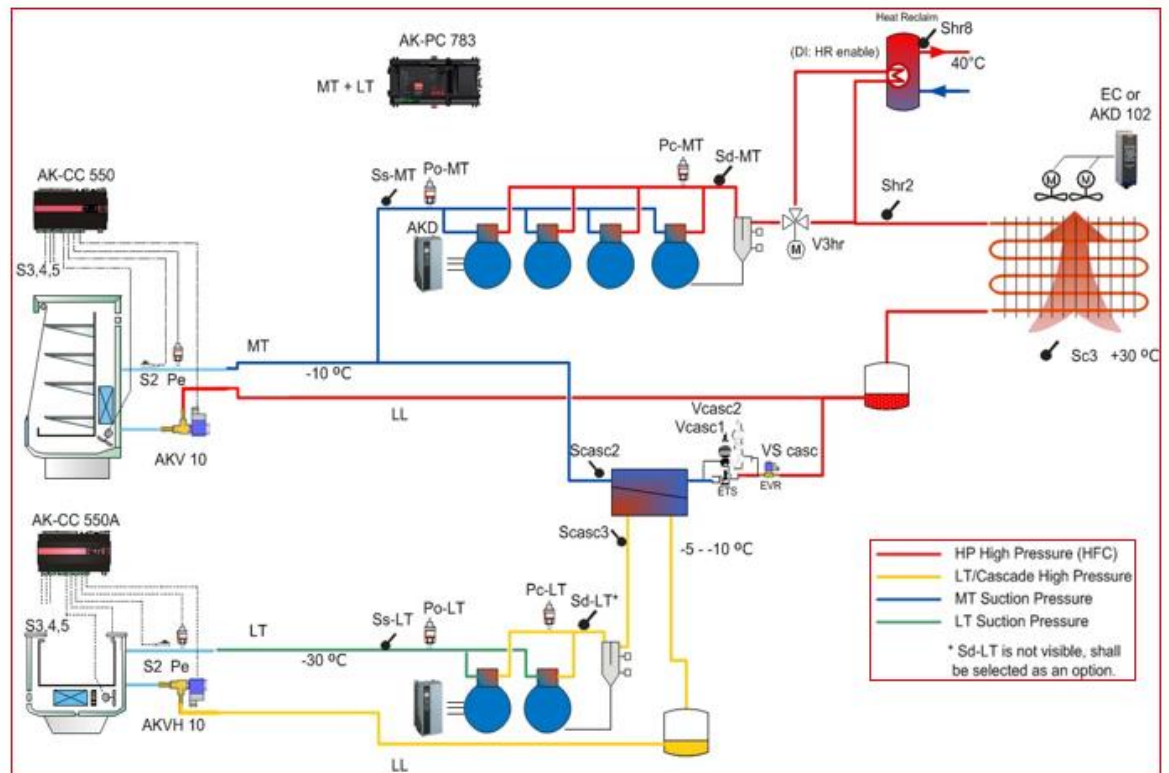
4.1 CO₂-järjestelmät

Niin kuin tavanomaisissa kylmäaineissa, hiilidioksidia voi myös hyödyntää usealla eri tavalla kylmäkoneistoissa. Hyödyntämistapaan vaikuttavat usein ympäristön olosuhteet

sekä käyttötarkoitus. Ensimmäiset CO₂-kylmäkoneistot olivat alikriittisiä kaskadikoneistoja, sen jälkeen alettiin käyttämään CO₂-boosterkoneistoja, jotka toimivat ylikriittisinä. Kylmäkoneistojen hyötysuhdetta kehitettiin erilaisilla kytkennöillä ja venttiileillä, kuten kaasunohituksella, rinnakkain puristavilla kompressoreilla sekä kaas- ja neste ejektoreilla. Ejektorikoneistot vaativat vielä kehitystä, eivätkä ne ole vielä suuresti markkinoilla, mutta ovat tulevaisuudessa varmasti järkevä ratkaisu CO₂-kylmäkoneistoihin. [8]

4.1.1 CO₂ -kaskadikoneisto

Suorahöyrysteiset ja pumppukiertoiset CO₂-kaskadikoneistot (kuva 10) olivat ensimmäisiä hiilidioksidilla toimivia kylmäkoneistoja. Hiilidioksidin käytön lisäksi kaskadikoneistoissa käytettiin joidenkin kylmähuoneiden ja -kalusteiden jäähdyttämiseen tavanomaista kylmäainetta. Kaskadikoneiston toiminta perustuu CO₂:n hyviin ominaisuuksiin suhteellisen matalassa paineessa ja lämpötilassa. Kylmäkoneisto hyödyntää alikriittiselle systeemille tarkoitettuja kompressoreja. Alikriittisiä kaskadi-koneistoja käytetään esimerkiksi kaupan kylmä- ja pakkaspuolella. [9]

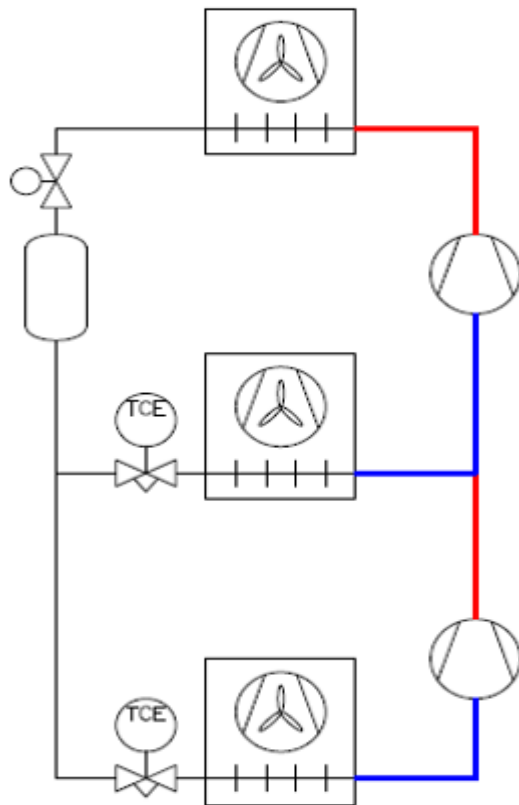


Kuva 10. Suorahöyrysteinen CO₂-kaskadikoneisto [9]

Kuvan 10 CO₂-kaskadikoneistossa on käytetty hiilidioksidia kylmäaineena pakastekalusteiden ja huoneiden kylmäntuotossa ja R404A-kylmäainetta kylmähuoneiden ja -kalusteiden kylmäntuotossa. Riippumatta kylmäaineesta matalan lämpötilan lauhtutinta ja korkean lämpötilan höyrytintä kutsutaan kaskadilämmönsiirtimeksi. [8]

4.1.2 CO₂-boosterkoneisto

Ylikriittisessä kylmäprosessissa käytetään usein booster-koneistoja (kuva 11), jotka soveltuvat etenkin kaupan kylmän tarpeisiin. Booster-koneistoista on tullut yleisin hiilidioksidia kylmäaineena käyttävä kylmäkoneisto kaupan kylmäkalusteissa ja -huoneissa sekä pakastekalusteissa ja -huoneissa. Booster-koneisto on suunniteltu niin, että osa CO₂-kylmäaineesta käytetään elintarvikkeiden viilentämiseen matalissa lämpötiloissa, kun taas osa kylmäaineesta käytetään esimerkiksi pakastehuoneiden kylmäntarpeeseen. Etuna esimerkiksi kaskadi-koneistoihin verrattuna on se, että booster-koneistossa ei tarvita kallista kaskadilämmönsiirintä, joka lisäksi aiheuttaa hyötysuhdetta heikentävän lämpötilaeron matalan lämpötilatason lauhtumislämpötilan ja korkean lämpötilan höyrystymislämpötilan välillä. Myöskään perinteellisiä kylmäaineita (esim. HFC R404A) ei tarvita ollenkaan, sillä ympäristöystävällisempi hiilidioksidi toimii kylmä- ja pakkaskalusteissa sekä huoneissa kylmäaineena. [9]



Kuva 11. CO₂-boosterkoneisto [9]

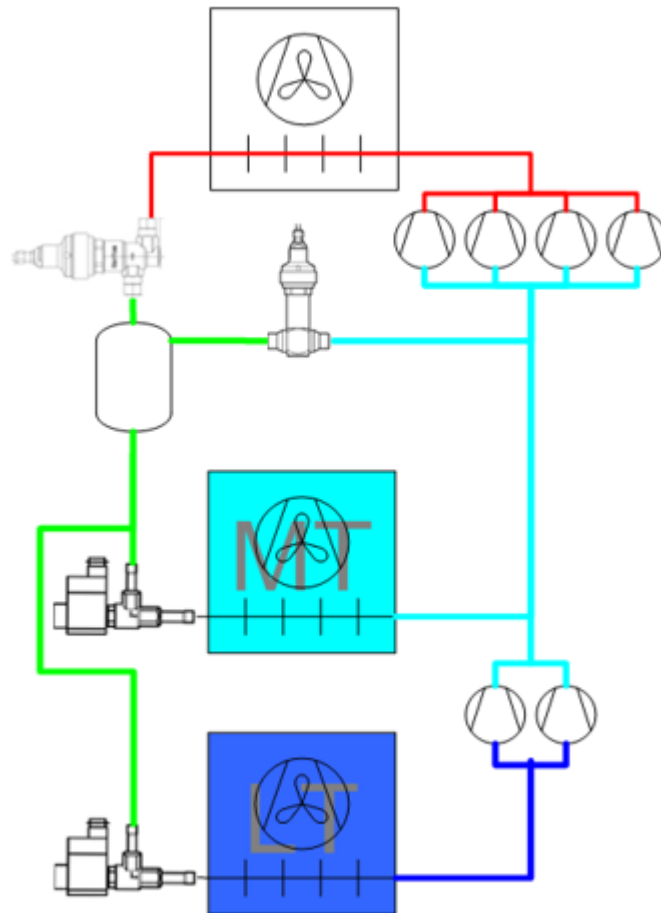
CO₂-boosterkylmäkoneikossa ylikriittistä kaasua jäähdytetään kaasunjäähdyttimessä, josta se kulkee paineensäätöventtiilin läpi, olosuhteiden mukaan säätävässä paineessa nestesäiliöön. [8]

Kuvassa 9 on matalapaine- ja korkeapainekompressoreilla varustettu boosterkoneisto. Matalapainepuolella kylmäaine jäähdyttää pakastehuoneita ja -kalusteita ja korkeapainepuolella vastaavasti kylmähuoneita ja -kalusteita. Matalapainepuolen kompressorit puristavat hiilidioksidin korkeapainepuolen höyrystymispaineen tason kanssa samaan paineeseen ennen kuin hiilidioksidi menee korkeapainepuolen kompressoreille. [8]

CO₂-boosterkoneiston korkeapainepuolta vertailtaessa tavanomaiseen kylmäaineeseen R404A, voidaan huomata suhteelliseen energiankulutukseen liittyviä kylmäaineiden ominaisuuksia. Hiilidioksidi on energiatehokkaampi kylmäaine alle + 27 °C:n ympäristön lämpötiloissa. Ympäristön lämpötilan ollessa yli 27 °C, hiilidioksidin energiatehokkuus kärsii ja silloin R404A-kylmäaine on energiatehokkaampi vaihtoehto. [9]

4.1.3 Boosterkoneisto kaasunohituksella

Booster-kylmäkoneistoon voidaan lisätä kaasunohitusventtiili säätämään nestesäiliön painetta. Kaasu johdetaan nestesäiliöstä korkeapainekompressoreiden imupuolelle. Kaasunohitusventtiilillä voidaan varmistaa, että ylikriittisessä prosessissa paine pysyy sallituissa rajoissa järjestelmän osissa, jossa kylmäaine kiertää nestemäisenä. [10]



Kuva 12. Booster-koneisto kaasunohituksella [9]

Booster-koneiston kaasunohitusprosessissa (kuva 12) paineensäätöventtiilin jälkeen kylmäaineen olomuoto on muuttunut neste-höyryseokseksi. Höyry johdetaan korkeapainekompressorin imupuolelle ohitusventtiilillä, joka samalla säätää nestesäiliön painetta. Prosessissa käytetty paine on 35–40 bar, mutta varotoimenpiteenä on mahdollista säätää nestesäiliön paine ja putkisto 60–80 bar:iin, jolloin varolaitteet eivät välittömästi aukea mahdollisen vian aikana. [11, s. 4.]

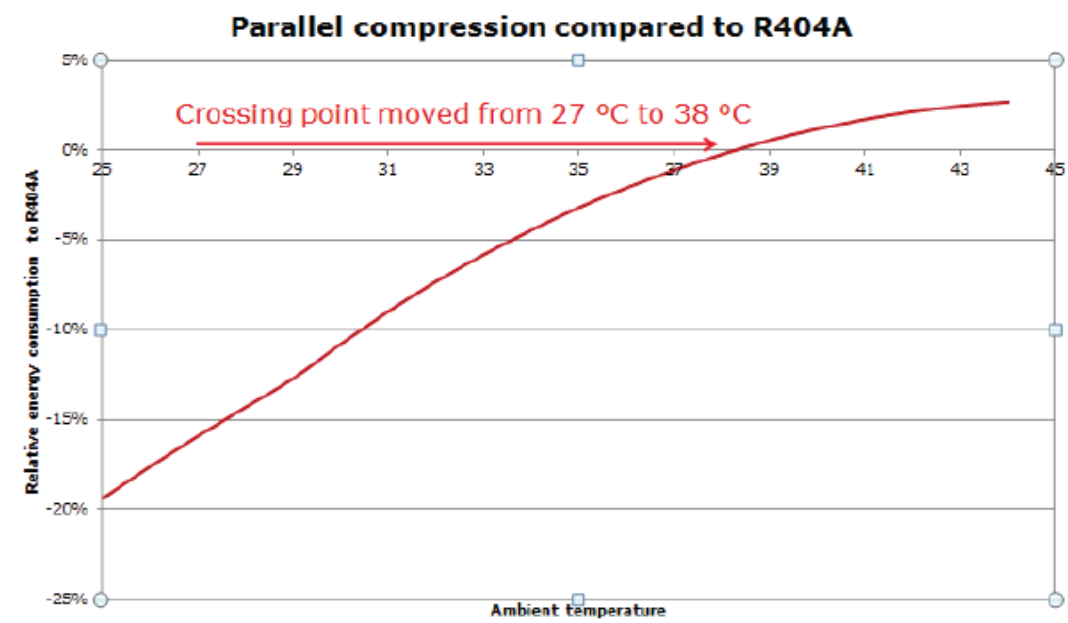


Kuva 13. Kaasunohitusventtiili (Danfoss CCMT) [16]

4.1.4 CO₂-koneiston rinnakkainen puristus

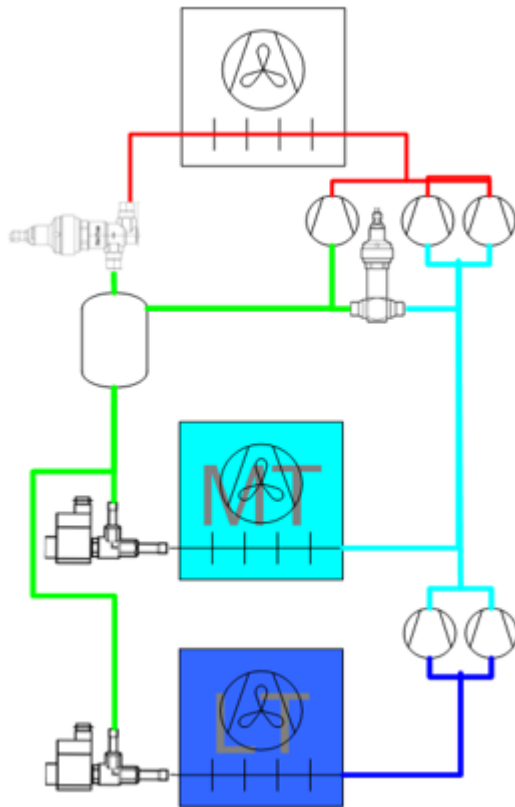
Hiilidioksidikylmälaitoksien hyötysuhdetta on vuosien aikana parannettu erilaisilla uusilla kytkennöillä, uusilla säätöventtiileillä sekä kehittyneimmillä ohjausjärjestelmillä. Näistä ehkä merkittävin kehitysaskel on ollut rinnakkaisen puristuksen kompressorit, joiden hyötysuhde on korkeamman imupaineen ansiosta parempi aikaisempiin korkeapainekompressoreihin verrattuna. Matalamman imupaineen takia perinteellisen laitostyyppin yksittäisen korkeapainekompressorin hyötysuhde on ollut heikompi kuin rinnakkaisen puristuksen kompressorin. Rinnakkaisen puristuksen kompressorit vievät myös vähemmän tilaa verrattuna iskuilavuudeltaan suuriin kompressoreihin. [9]

Rinnakkainen puristus parantaa hyötysuhdetta ja säästää näin energiaa varsinkin lämpimissä maissa. Tutkimusten mukaan rinnakkainen puristus säästää energiaa verrattuna R404A-kylmälaitoksiin niin kauan, kun lämpötila pysyy alle 38 °C:n (kuva 14). [15]



Kuva 14. Suhteellinen energiankulutus ulkolämpötilan funktiona. [15]

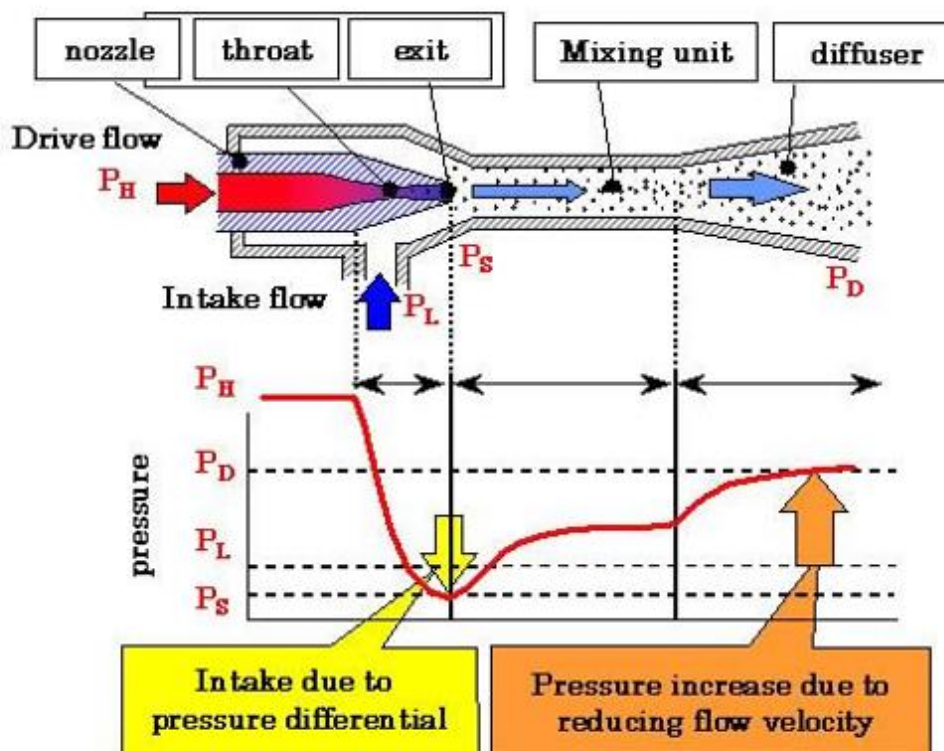
Kylmäkoneiston tehon ollessa yli 100 kW, on rinnakkainen puristus (kuva 15) kustannus-
tehokkaampi ratkaisu, mutta hankalan toteutuksen vuoksi, tehon ollessa pienempi, ei
rinnakkainpuristus enää ole kustannusten kannalta järkevä ratkaisu. [8]



Kuva 15. Booster rinnakkaisella puristuksella [9]

4.1.5 CO₂-ejektorit

Ejektorin idea on ollut tiedossa yli 100 vuotta, ja sitä on käytetty erilaisissa käytöissä. Hiilidioksidikylmäkoneistoissa ejektoreilla voidaan teoriassa parantaa varsinkin yhdessä rinnakkaisen puristuksen kanssa koneiston hyötysuhdetta (pienentää kompressoreiden kuormitusta) erityisesti lämpimissä maissa. Erilaisten ejektorijärjestelmien avulla voidaan tehdä halvempia ja pienemmällä teholla toimivia kylmäkoneistoja. Ejektoreiden käyttö kylmäkoneistoissa mahdollistaa entistä paremman hyötysuhteen. [8]



Kuva 16: Ejektorin toimintaperiaate [9]

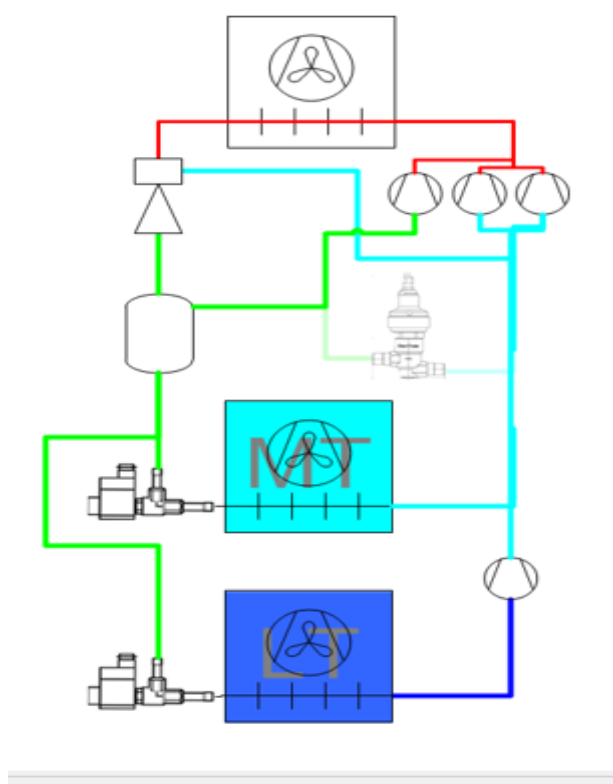
Kuvassa 16 näkyy kuinka päävirtaus (drive flow) tulee ejektoriin paineessa P_H , ja kun suutin (nozzle) kuristaa virtausta, sen nopeus kasvaa ja paine laskee tasolle P_S . Virtaukseen imeytyy tällöin hiukan korkeammassa paineessa P_L olevaa hiilidioksidia. Sekoittajan (mixing unit) jälkeen hajottimessa (diffuser) virtausnopeus hidastuu ja paine kohoaa tasolle P_D . [8]

Hiilidioksidiejektorijärjestelmiä ovat esimerkiksi kaasu- ja neste-ejektorijärjestelmät. Kaasuejektorijärjestelmän toiminta perustuu kylmäprosessin höyryn liikuttamiseen korkeapainekompressoreiden imupuolelta rinnakkain asennettujen kompressorien imupuolelle, jolloin prosessi toimii paremmalla hyötysuhteella. Neste-ejektorijärjestelmä toimii eri tavalla, sillä kylmäainetta ei tulisteta ollenkaan, vaan prosessi toimii ”märkähöyrystimen tavoin.” [8]

Multiejektori on useamman ejektorin yhdistelmä, jossa sitä voidaan käyttää energiatehokkaasti eri tehoilla. Yleensä pyritään siihen, että hyötysuhde on mahdollisimman hyvä, ja silloin ejektorin täytyy olla säädetty koneiston tehon mukaisesti. Multiejektori mahdollistaa esimerkiksi neljän tai kuuden binäärisesti mitoitettun ejektorin yhdistelmän, jolloin

ejektorit on säädetty mahdollisimman energiatehokkaasti. Multiejektorit sopivat parhaiten 100–300 kW:n tehoisille kylmäkoneistoille. [8]

Kuten aiemmin jo mainittiin, ejektorijärjestelmät (kuva 17) ovat vielä tuotekehitysvaiheessa, mutta ensimmäiset testilaitokset ovat jo toiminnassa (myös Suomessa). Koska kaikkia teknisiä ongelmia ei ole vielä ratkaistu, laajempaan käyttöön ottoon menee vielä muutama vuosi. Pienitehoisiin koneistoihin tarvitaan yksinkertainen ja kustannustehokas ratkaisu. Esko Kaappolan mukaan ejektoreiden uskotaan tulevan markkinoille noin vuoden kuluttua. [8]



Kuva 17. Kaasuejektorijärjestelmä [9]

4.1.6 Uusien laitostekniikoiden energiansäästöpotentialiaali

Norjalainen tutkimuslaitos SINTEF on yhdessä Danfossin kanssa tutkineet uusien tekniikoiden (esim. ejektorit) vaikutusta eri CO₂-kylmälaitoksen hyötysuhteeseen. Vertailussa arvioitiin uusien teknisten innovaatioiden avulla saatavaa energian säästöä verrattuna R404A ja tavalliseen booster-laitokseen. [15]

Taulukossa 1 on esitetty arviot mahdollisista säästöistä.

Taulukko 1. Mahdollinen energian säästö; rinnakkainen puristus kaasuejektorin kanssa ja rinnakkainen puristus kaasu & neste-ejektorin kanssa. Vertailu tehtiin + 32 °C:ssa. [15]

System	Energy saving VS. R404a	Compressor saving VS. Booster
Booster	-11%	0%
Parallel compression	7%	15%
Gas ejector	10%	18%
Liquid & gas ejector	22%	27%

4.2 Lauhdelämmön talteenotto

Energiatehokkuuden kannalta kaikki lämpöenergia kannattaa hyödyntää jollain tavalla. Jäähdytyksessä lauhdutus tarkoittaa tilannetta, jossa kompressorissa ja höyrystimessä muodostunut lämpöenergia luovutetaan pois. Yleisin tapa varsinkin pienissä koneistoissa on luovuttaa kylmäaineeseen prosessissa muodostunut lämpöenergia suoraan ilmaan. Isommissa kohteissa, kuten esimerkiksi S-marketien kylmäkoneistoissa voidaan hyödyntää lauhdelämmöstä saatavaa lämpöenergiaa myymälän lämmityskohteissa. Lämpöenergiaa voidaan käyttää kaupassa esimerkiksi lattialämmityksen, käyttöveden tai tuloilman lämmittämiseen, joka vähentää muita lämpöenergia kustannuksia. Kylmäkoneistoista saatu lauhdelämpöenergia ei kuitenkaan aina riitä yksinään kattamaan kaikkia lämmitystarpeita, mutta esimerkiksi kaukolämmön ohessa lisäenergian lähteenä sen käyttö on hyvinkin kannattavaa. [11, s. 11.]

Tyypillisesti kaupan CO₂-boosterkylmäkoneistoissa lämpöä käytetään useaan eri tarkoitukseen, ja tavoitteena on, että lämmöntalteenotto järjestelmä olisi mahdollisimman toimiva ja energiatehokas. Jos keskitytään vain kylmäprosessin tai vain lämmöntalteenoton hyötysuhteen optimointiin, tulos ei ole paras mahdollinen myymälän kokonaishyötysuhteen kannalta. Usein voi syntyä tilanne, että kylmäprosessin hyötysuhdetta ”uhrataan” lämmöntalteenoton eduksi, mutta myymälän kokonaishyötysuhde saadaan tällöin mahdollisimman hyväksi. Tämä vaatii suunnittelijoilta erityisosaamista koskien hiilidioksidin ominaisuuksista ja kylmäprosessin ja lämmön talteenoton osalta. Lisäksi

toimiva myymälän kokonaisjärjestelmä vaatii eri osa-alueiden suunnittelijoiden (kylmä, rakennusautomaatio) yhteistyötä. [11, s. 11.]

4.3 Korkeapaineen vaikutus ylikriittisen koneiston hyötysuhteeseen

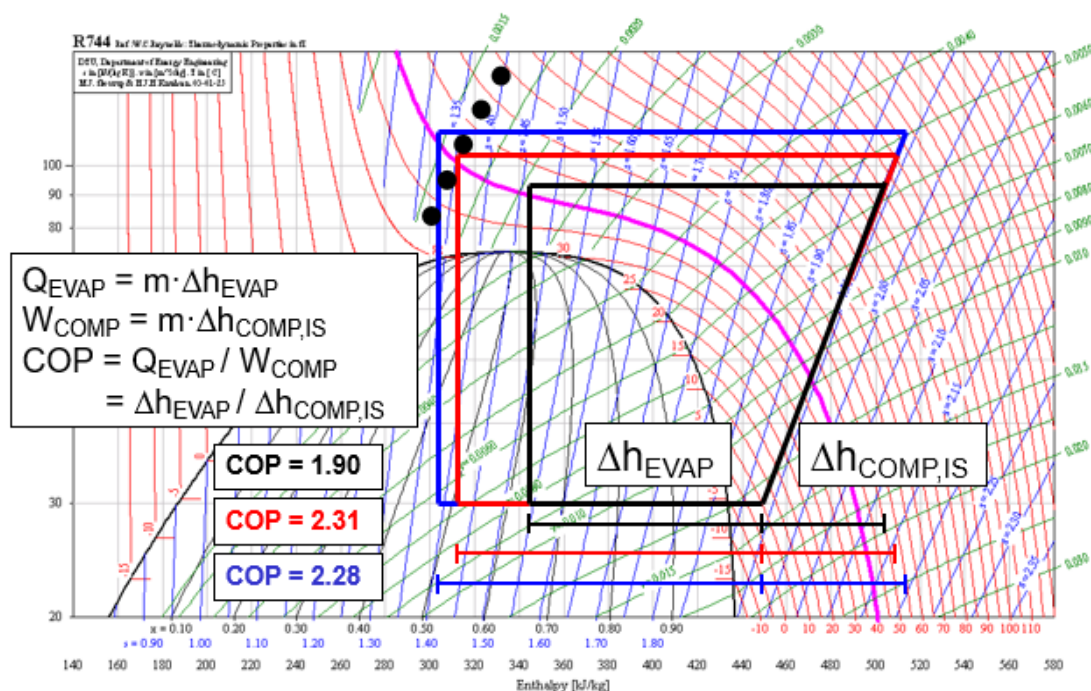
CO₂-kylmäkoneistoissa tavoitellaan mahdollisimman energiatehokasta, turvallista ja ympäristöystävällistä jäähdytystä. Painetasot vaikuttavat hiilidioksidista saatavaan kylmätehon hyötysuhteeseen. Suomen Kylmäyhdistys ry:n mukaan:

Koneiston jäähdytysteho on verrannollinen kylmäaineen entalpian muutokseen höyrystimessä (Δh_{EVAP}). Vastaavasti ottoteho on verrannollinen entalpian muutokseen kompressorissa (Δh_{COMP}). [11, s. 5]

CO₂ kylmäaineen hyötysuhde lasketaan kaavalla 1.

$$COP = \frac{\Delta h_{EVAP}}{\Delta h_{COMP}} \quad (\text{Kaava1})$$

Kuvassa 18 log p, h -tilapiirroskuvasta voidaan nähdä, että + 40 °C:ssa (violetti vakio- lämpötiläkäyrä) hyötysuhde on 100 bar:n paineessa paras. Paineen muuttuessa hyötysuhde heikentyy, jos lämpötila pysyy samana.



Kuva 18. Kompressorin ulostulopaineen vaikutus [11, s. 5]

5 Referenssikohteen tutkimus

5.1 Referenssikohte

CO₂-kylmäaineen ominaisuuksia tarkasteltaessa referenssikohteena toimii Espoon Ku-tojantie 1 sijaitseva S-market Nihtisilta. S-market Nihtisilta avasi ovensa asiakkailleen 3.4.2014 ja myymälässä on yli 13 000 erilaista tuotetta. S-market toimii osana liikekes-kusta, jonka pinta-ala on 3 300 neliometriä. Tästä liikekeskuksesta S-marketin osuus 1 400 neliometriä, ja loput liikekeskuksen pinta-alasta vievät erilaiset muut palvelut, esi-merkiksi ruokaketju Subway ja parturikampaamo Hair Fendi.

S-market Nihtisillassa on otettu käyttöön ympäristöystävällisempi CO₂-kylmälaitteisto, joka palvelee kaupan kylmätehon tarpeita. Tämän vertailun tavoitteena on, että toimek-siantaja HOK-Elanto saa riittävästi tietoa keskikokoisiin S-market-myymlöihin vaaditta-vasta kylmälaitteiston tehon-tarpeesta, koneiston kokoonpanosta, sekä energian kulu-tuksesta. Tässä työssä S-market Nihtisillan CO₂-kylmälaitteiston toimintaa arvioidaan vuoden 2015 kuukausien kylmälaitteiston tehon kulutustiedoilla. Tiedot on saatu Dan-fossin ohjausjärjestelmään kuuluvasta EM100-yksiköstä. [18]

5.2 Energiatehokkuus nykyaikaisissa elintarvikemyymälöissä

5.2.1 Kylmäteknikka ja kylmäkalusteet

Nykyaikaisissa elintarvikemyymälöissä mahdollisimman energiatehokkaat ratkaisut ovat tulleet tärkeäksi niin energiakustannuksien kannalta, kuin myös vihreän imagon sekä lainsäädännön kannalta. Elintarvikkeiden jäähdytyksessä käytetty kylmäteknikka vie helposti yli 50 % koko myymälän energiankulutuksesta, ja siksi energiatehokkuus korostuu elintarvikemyymälöiden kylmäteknikassa. CO₂-kylmäkoneistot ja CO₂-järjestelmät ovat muuttaneet kaupan kylmätehon tuottamisen energiatehokkaammaksi. Lisäksi energiakustannuksia on minimoitu kehittämällä kaupan kylmäkalusteita mahdollisimman energiatehokkaiksi sekä suunnittelemalla kylmäkalusteisiin mahdollisimman käytännölliset kannet ja ovet, joita asiakkaiden on helppo käyttää. Yönaikaisen säilytyksen kylmätehoa voidaan vähentää yöverhoilla, sillä kaupassa ei yöaikaan ole asiakkaita eikä kylmäkalusteiden kansia tai ovia availla. [19]

5.2.2 Elintarvikkeiden myynti- ja säilytyslämpötilat

Monet elintarvikkeet vaativat todella tiukat lämpötila vaatimukset etteivät ne pilaannu. Maa ja metsätalousministeriön asetuksen 1367/2011 mukaan eri elintarvikkeet vaativat säilyäkseen esimerkiksi seuraavat olosuhteet:

”(max. +2 °C) Tuoreet kalastustuotteet ja keitetyt äyriäiset ja nilviäiset.”

”(0...+3 °C) Kylmäsavustetut ja tuoresuolatut kalastustuotteet, tyhjiö- ja suojakaasupakatut jalostetut kalastustuotteet.”

”(max. +6 °C) Muut helposti pilaantuvat elintarvikkeet mukaan lukien maito, kerma, idut, paloitetut kasvikset, elävät simpukat, sushi.” [20]

Pakasteet vaativat usein matalat lämpötilat säilyäkseen. Maa ja metsätalousministeriön asetus 818/2012 vaatii eri pakasteille säilyäkseen seuraavat olosuhteet:

"Pakasteiden lämpötilat on oltava vakaat ja pysyttävä tuotteiden kaikissa osissa korkeintaan -18 °C:ssa." [21]

5.3 Jäähdytystehontarpeet myymälöissä

Useat kylmäkalusteiden ja -koneistojen valmistajat käyttävät mitoituksessaan ns. yleis-eurooppalaisia olosuhteita, jolloin "jäähdytystehontarvearvot pohjautuvat standardin ISO 23953-2 mukaisesti, olosuhteessa + 25 °C / 60 % -rh tehtyyn suoritustestiin." Nämä arvot eivät vastaa esimerkiksi Pohjoismaissa tyypillisesti esiintyviä olosuhteita, ja olosuhde-erot aiheuttavat kylmäkoneistojen ylimitoituksen. Koneiston ylimitoitus johtaa ylimääräisiä energia kustannuksia, sillä esimerkiksi booster-kylmäkoneistossa rinnan kytketyt kompressorit eivät toimi optimaalisissa kuormitusolosuhteissa. Samoin ylimitoitus lisää alkuinvestointia. [19]

Myymälän sisäilmaolosuhteen muuttuessa huomattavasti mitoitus tilannetta kevyemmäksi voi koneikolle tulla ongelmia pysyä käynnissä => ylimitoitus ja huonosti valitut tehoportaavat korostavat ongelmaa. [19]

Edellä mainitusta tilanteesta voidaan käyttää nimitystä huojuva systeemi, joka ei ole energiatehokas tapa tuottaa kylmäenergiaa. Liian suuret tehoportaavat aiheuttavat ns. päätäkäyntiä ja laitoksen huojuntaa, kun viimeinen tehoporras käynnistyy ja pysähtyy jatkuvasti, kun kuormitus on minimissään esimerkiksi yöaikaan. [19]

5.4 Kylmäkoneistojen simulointi

HOK-Elannon huoltopäälliköltä Mikko Keitaanrannalta saaduilla CO₂-kylmäkoneiston kompressor- ja käyntitiedoilla tehtiin insinööriyössä koneiston toimintaa kuvaava simulointi. Simulointi tehtiin Pack Calculation Pro (IPU/The Technical University of Denmark) -ohjelmalla, jolla oli tarkoitus tehdä S-market Nihtisillan kylmäkoneiston toimintaa kuvaava simulointi, jossa on otettu huomioon Helsingin sääolosuhteet, koska Espoon sääolosuhteita ei ollut valittavissa ohjelmassa. [22]

5.4.1 Sisäilmaolosuhteet

T, C	RH 30%	RH 40%	RH 50%	RH 60%	RH 70%	RH 80%	RH 90%
16	0,44	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,76
18	0,50	0,56	0,62	0,68	0,74	0,80	0,86
20	0,56	0,63	0,70	0,76	0,83	0,90	0,97
22	0,62	0,70	0,78	0,85	0,93	1,01	1,08
24	0,69	0,78	0,86	0,95	1,04	1,12	1,21
25	0,72	0,82	0,91	1,00	1,09	1,19	1,28
27	0,80	0,90	1,00	1,11	1,21	1,32	1,43
30	0,91	1,03	1,16	1,28	1,41	1,54	1,67

Kuva 19. Sisäilmaolosuhteiden vaikutuksesta kylmätehon tarpeeseen [19]

Referenssikohteen kylmäkoneiston kompressoreiden suhteellisen alhaiseen käyntias- teeseen (kuva 19) vuoden kuumimpina päivinä voivat vaikuttaa esimerkiksi S-market Nihtisillan modernit energiatehokkaat kylmäkalusteet sekä myymälän ilmastoinnin kui- vaava jäähdytys. [25]

6 Yhteenveto

Insinööriytyössäni tutkittiin kolmen eri muokatun kompressorikokoonpanon vaikutusta energiankulutukseen ja kompressorien käyntitehoihin. Kompressorikokoonpanojen si- mulointi tehtiin Pack Calculation Pro -ohjelmalla, jossa kompressorikokoonpanoina toi- mivat:

1. Sama määrä, mutta pienemmät kompressorit
2. Vähemmän kompressoreita
3. Bitzer CO₂ laskentatyökalun ehdottamat kompressorit.

Simulointien tuloksena saatiin uutta tietoa CO₂-kylmäkoneiston energiankulutuksesta ja kompressorien käyntitehoista. Näitä tuloksia HOK-Elanto voi käyttää hyödyksi tulevilla myymäläprojekteilla.

Suosittelavaa on, että vuoden kuumimpina päivinä kylmäkoneisto kävisi täysillä, mutta suunniteltaessa kylmäkoneistoa on hyvä jättää laajennusvaraus. Suositeltavaa on, että vuoden kylmimpinä päivinä kylmäkoneiston kompressorit kävisivät pysähtymättä pienimmällä tehoportaalla.

Tutkimus tehtiin HOK-Elannolle ja sen vuoksi tulokset eivät ole julkisia. [25]

Lähteet

- 1 HOK-Elanto. Yrityksen kuvaus. Verkkodokumentti. S-RYHMÄ.
<https://www.s-kanava.fi/web/hok-elanto/yrityksesta>. Luettu 12.03.2016
- 2 Verkkodokumentti aiheesta hiilidioksidi. Verkkodokumentti Advansor. About CO2.
<http://www.advansor.dk/en/raadgivning/om-co2/>. Luettu 15.03.2016
- 3 Kaappola Esko. 2007. CO2:n ominaisuuksista ja sovelluksista kylmäteknikassa. Koulutusmateriaali. SUOMEN KYLMÄYHDISTYS ry. Luettu 15.03.2016
- 4 Suomen Kylmäliikkeiden Liitto r.y. Yleistä kylmäaineista ja niiden rajoituksista verkkodokumentti. <http://www.skll.fi/www/att.php?id=45>. Päivitetty 20.2.2008. Luettu 28.01.2016.
- 5 Verkkodokumentti aiheesta hiilidioksidi. Advansor. CO2 in refrigeration systems.
<http://www.advansor.dk/en/raadgivning/kredsprocesser-og-energiforbrug>. Luettu 16.03.2016
- 6 Suomen Kylmäliikkeiden Liitto r.y. Luonnolliset kylmäaineet verkkodokumentti.
<http://www.skll.fi/www/att.php?id=44>. Päivitetty 21.2.2008. Luettu 29.1.2016.
- 7 Kaappola Esko. 2016. Danfoss komponentit CO2-koneistoihin. kylmäkoulutuspäivät luentomateriaali. Combi Cool. Luettu 02.03.2016
- 8 Kaappola Esko. CO2-tekniikan kehitysnäkymiä. Lähiopetustuntien muistiinpanot. Luettu 17.03.2016
- 9 Kaappola Esko. CO2-tekniikan kehitysnäkymiä. Lähiopetustuntien luentomateriaali. Luettu 17.03.2016
- 10 Powerpoint-esitys. 2010. CO2-kaasunohitusventtiilit. Danfoss. Päivitetty 01.07.2010. Luettu 01.03.2016
- 11 Kaappola Esko. 2012. 2-asteiset CO2-kylmälaitokset. Koulutusmateriaali. SUOMEN KYLMÄYHDISTYS ry. Luettu 18.03.2016
- 12 Carbon dioxide. About safety. Verkkodokumentti. Advansor.
<http://www.advansor.dk/en/raadgivning/om-co2/>. Luettu 20.03.2016
- 13 Kaappola Esko. 2012. Hiilidioksidikylmälaitos. Historiaa ja nykyaikaa. koulutusmateriaali. Päivitetty 30.10.2012. Luettu 20.03.2016
- 14 Energiätehokkuus. HOK-Elanto. Verkkodokumentti. S-Ryhmä.
<https://www.s-kanava.fi/web/hok-elanto/yrityksesta/vastuullisuus/ymparisto/energiatehokkuus>. Luettu 22.03.2016

- 15 Kenneth Madsen & Anders Juul. 2015. Making the case for CO2 refrigeration in warm climates. Tekninen artikkeli. Danfoss. Päivitetty joulukuussa 2015. Luettu 20.03.2016
- 16 Danfoss. Verkkosivu. CO2-tuotteet. <http://products.danfoss.com/productrange/refrigeration/electronically-operated-valves/ccmt-high-pressure-expansion-valve-co2-transcritical/>. Luettu 22.03.2016
- 17 Esko Kaappola. GWP ja ODP -Diagrammi. Historiaa ja nykyaikaa. Lähiopetustunti-materiaali. Kenneth Madsen
- 18 HOK-Elanto. Verkkodokumentti. Nihtisillan uusi S-market avattu. 2014. S-RYHMÄ. Päivitetty 04.2014. Luettu 20.03.2016. http://www.hok-elanto.fi/2014/04/nihtisillan-uusi-s-market-avattu/http://www.smarkethokelanto.fi/s-market_espoo
- 19 Tomi Sipilä. 2014. Nykyaikaisen elintarvikemyymälän kylmätehontarpeen laskenta kylmäkoulutuspäivämateriaali. Suomen Kylmäyhdistys ry. Luettu 24.03.2016
- 20 Maa ja metsätalousministeriön asetus 1367/2011 7 §. Finlex <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20111367>. Luettu 25.03.2016
- 21 Maa ja metsätalousministeriön asetus 818/2012 3 §. Finlex <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2012/20120818>. Luettu 25.03.2016
- 22 Pack Calculation Pro version 4.20. Laskentaohjelman ilmaisversio.IPU/The Technical University of Denmark.
- 25 Esko Kaappolan (Senior Refrigeration Expert, Danfoss) kanssa käydyn keskustelun pohjalta tehty johtopäätö

